

煤矿采矿工程中充填采矿技术的应用

王炎凯 赵伟 李骁

山西襄矿晋平煤业有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8695

[摘要] 充填采矿技术作为一种绿色、高效的采矿方法，通过将充填材料填入采空区，有效控制围岩变形与地表下沉，同时提升资源回收率，在煤矿采矿工程中的应用愈发广泛。本文将从充填采矿技术概述入手，详细分析煤矿采矿工程中充填采矿技术的应用，为煤矿行业的可持续发展提供参考。

[关键词] 煤矿；采矿工程；充填采矿

Application of filling mining technology in coal mining engineering

Wang Yankai Zhao Wei Li Xiao

Shanxi Xiangkuang Jinping Coal Industry Co., Ltd.

[Abstract] As a green and efficient mining method, backfill mining technology is increasingly widely applied in coal mining engineering. By filling the goaf with backfill materials, it effectively controls the deformation of surrounding rocks and surface subsidence, while enhancing resource recovery rates. This article will start with an overview of backfill mining technology and provide a detailed analysis of its application in coal mining engineering, offering a reference for the sustainable development of the coal mining industry.

[Key words] coal mine; mining engineering; backfill mining

引言

我国拥有丰富的煤炭资源储备，但不少煤炭资源赋存区域的地质条件复杂，常规开采方式存在资源回收率低、生态环境破坏严重等问题。在可持续发展和绿色发展理念持续深化的背景下，煤矿开采需同时满足绿色、安全、高效的要求，充填采矿技术凭借自身具备的采空区即时支撑、控制围岩变形等优势，成为煤矿采矿工程中的核心技术之一。研究充填采矿技术在煤矿采矿工程中的应用，对实现煤炭行业的绿色可持续发展具有重要意义。

1 充填采矿技术概述

充填采矿技术是一种在矿石开采过程中向采空区注入充填材料的采矿方法，旨在支撑围岩、控制地压，实现安全、高效开采，其利用充填体代替已采矿石形成的空区，发挥物理学作用维持矿山区域结构的稳定性，避免围岩塌陷和地表沉降。充填采矿技术对于地质条件复杂型、环境保护敏感型、高价值资源型矿山采矿工程适用性较高。通过科学选用技术类型，细化技术方案，针对矿体或围岩不稳固区域进行充填处理，一方面，能与围岩紧密结合，共同承担上覆岩层的压力，有效

降低因地压失衡出现塌方、冒顶等安全事故的概率，为围岩提供有效支撑；另一方面，充填料构成较强的充填体，能代替矿柱支撑采场顶板和围岩，从而减少矿柱的留设数量，甚至实现无矿柱开采，对于提升矿石的回采率、减少资源浪费具有积极意义。

2 矿山采矿工程中充填采矿技术类型

2.1 干式充填法

干式充填法属于一种较为传统的充填采矿技术，其核心在于借助矿车、风力或其他机械装置，将废石、砂石等充填料运输至采空区，通过合理堆放使其均匀分布在采空区，达到支撑的目的。该充填法成本较低且充填材料来源相对广泛，如矿山开采过程中产生的废石、废料等均可直接作为充填料，一定程度上降低了采购和运输成本，同时对矿体形态的适应性较强，形状不规则及复杂矿体均可采用该充填方案。需要注意，充填过程中会产生大量粉尘，应加强通风，将粉尘质量浓度控制在 $<2\text{mg}/\text{m}^3$ 的范围内，保证充填环境。

2.2 水砂充填法

水砂充填法适用于地形复杂或充填距离较远的采空区，主

要将尾砂、河砂、炉渣等充填骨料按照一定比例与水混合制成质量浓度较低的砂浆后，利用砂浆泵或自流的方式，将其输送至指定的井下充填点。当砂浆被送至采空区后，充填料在重力作用下自然下沉，清水和细砂会通过过滤设施排出，充填效果更佳。该充填法可有效减缓地表下沉的速度，保护地表设施和生态平衡。

2.3 胶结充填法

胶结充填法工艺简单、施工效率高且充填材料强度大，将其应用到矿山采矿工程中，能更好地提高矿区安全性。通过在充填材料中添加胶结剂，将河砂、尾砂等骨料与胶结剂按照一定比例进行充分搅拌，制备成质量浓度较低的浆体或膏体，再通过管道自流或专业的泵送设备，将其输送至井下待填区，能有效提高充填体的强度。养护是该技术实施的重要环节，适宜的养护温度为 15~25℃，适宜的相对湿度≥90%，有助于提高充填区域的强度，使其形成较高强度的固化体。

2.4 膏体充填法

膏体充填法主要将一种或多种材料按照一定比例与水混合，采用特殊的制备工艺制成无需脱水且无临界流速的牙膏状浆体，使用专用的大型工业泵输送至采空区的充填采矿方式，常用材料有尾砂、河砂、粉煤灰、胶结料等。该充填方式环保性较强且充填效率较高，充填方案实施过程中，将大量的废弃物转化为充填材料，且不会产生有毒有害物质污染土壤、水体和空气。此外，膏体充填料浆具有较好流动性和稳定性，在管道输送过程中出现沉淀、离析、堵管等问题的概率较小，能实现长距离、大高差高效输送，提高采矿安全性和效率。

2.5 高水材料充填采矿技术

以高水速凝材料为胶结剂，与骨料混合后制备成高水充填体，具有凝结速度快、早期强度高、体积收缩小等特点。该技术适用于紧急充填场景，如采空区顶板出现垮落隐患时，可快速充填形成支撑体；同时，高水充填体具有良好的塑性，能够适应围岩的轻微变形，避免充填体开裂。此外，高水材料充填无需复杂的脱水工艺，充填后多余水分可通过围岩渗透排出，适用于含水量较高的煤矿。

3 煤矿采矿工程中充填采矿技术的应用

3.1 做好技术选型

在技术选型环节，需要充分结合煤矿开采场景的差异性，坚持安全性、经济性、适配性的基本原则。例如，对于薄煤层开采，考虑其采场空间相对狭窄，可以选择似膏体充填技术，借助充填材料本身良好的流动性，搭配小型输送设备即可完成充填作业，且材料成本比膏体充填技术更低，能够充分满足薄煤层开采对经济性的要求。对于高瓦斯煤层开采，可以选择膏体充填或似膏体充填技术，通过充填体快速封闭采空区，压缩

瓦斯积聚空间，降低采场漏风率。对于特殊煤层，如“三下”（建筑物下、铁路下、水体下）煤层开采，可以选择膏体充填技术，膏体凝结后形成的充填体具有较高的强度，能够实现对上覆岩层移动的有效控制。

3.2 优化材料配比

充填材料的配比会直接影响充填体的强度、输送效率等性能，需要结合实际开采需求，做好材料配比的合理优化。以当前应用最广泛的膏体充填材料为例，在配比优化设计过程中，需要解决 3 个核心问题。

1) 灰砂质量比。灰砂质量比指水泥与砂的质量比，该参数直接决定充填体强度。不同煤层对充填材料灰砂质量比的要求有所不同，充填体强度超过 1.5MPa 即可；特殊煤层（如“三下”煤层）开采要求充填材料 28d 抗压强度不低于 2.5MPa，灰砂质量比通常控制在 1:6~1:4 之间。2) 骨料级配。膏体充填材料的骨料多为煤矸石和粉煤灰，二者质量比通常为 3:7~5:5。其中，煤矸石粒径最大不超过 5mm，控制粉煤灰粒径，该级配可显著提升料浆密实度，降低泌水率。

3) 料浆质量分数。材料配比设计与优化中，需强化对料浆质量分数的控制。料浆质量分数过高会导致流动性下降，易造成输送管道堵塞；质量分数过低则会因泌水率偏大影响充填体强度。实际应用中，普通煤层需将充填料浆质量分数控制在 75%~80% 之间，“三下”煤层则需将质量分数控制在 78%~85% 之间，以实现料浆流动性与强度的动态平衡。

3.3 充填系统的设计与优化

充填系统包括搅拌系统、输送系统、充填管路与控制系统，其设计合理性直接影响充填效率与质量。搅拌系统应根据充填量选择合适的搅拌设备，确保充填材料混合均匀，对于膏体充填，需采用双轴搅拌机或行星式搅拌机，搅拌时间≥3min；输送系统需根据充填距离与高度选择输送方式，短距离、低高度可采用溜槽输送，长距离、高高度应采用管道泵送，泵送压力需根据管路阻力计算确定，通常为 10~30MPa。充填管路应选择耐磨、耐腐蚀的管材，管路布置需避免急弯与陡坡，减少管路堵塞风险；控制系统应配备流量、压力、浓度等监测设备，实时监控充填过程，及时调整充填参数，确保充填体密实度符合要求（密实度≥90%）。

3.4 采空区充填工艺的优化

采空区充填工艺需结合煤矿开采方法（如走向长壁开采、倾斜长壁开采、房柱式开采等）与采空区形态进行设计。对于长壁开采形成的长条状采空区，可采用分段充填或连续充填工艺，充填顺序应从采空区远端向近端推进，确保充填体密实；对于房柱式开采形成的分散采空区，可采用定点充填工艺，通过钻孔将充填体注入采空区。同时，需控制充填速度与充填高

度,避免充填体离析或溢出,充填速度通常为 30–50m³/h,充填高度应与采空区高度一致,预留 50–100mm 的沉降空间。此外,充填完成后需对充填体进行养护,养护时间 $\geq 7d$,确保充填体强度达到设计要求后再进行后续采矿作业。

3.5 加强作业监测

为了能够最大限度地保障充填效果和采场安全,应该加强相应的作业监测工作。1)对充填体的性能进行监测。可以在采空区布置专门的强度监测点,以 3d 为间隔,测量充填体强度,确保其 28d 抗压强度达标。同时,需要监测充填体的泌水率,如果泌水率超过 3%,需要及时做好料浆质量分数的调整。2)做好围岩变形监测工作。可以使用应力传感器搭配位移计,实时监测煤矿采场围岩的应力变化和位移情况,如果发现围岩应力超过 20MPa,或者位移超过 10mm,需要适当增大充填量。3)对地表沉陷进行监测。在开采区域地表设置监测点,以 7d 为间隔测量 1 次地表沉陷情况,设定沉陷阈值,若发现地表沉陷超过阈值,必须及时做好充填参数的优化。

4 充填采矿技术在煤矿采矿工程中的具体应用场景

4.1 深部煤矿开采

随着浅部煤炭资源的日益枯竭,深部开采已成为我国煤矿行业的发展趋势。深部煤矿面临着高应力、高瓦斯、高地温等复杂地质条件,传统采矿技术易引发围岩失稳、顶板垮落等安全事故。充填采矿技术通过充填体的支撑作用,能够有效抵消部分围岩应力,降低巷道变形与顶板垮落风险。例如,某深部煤矿开采深度达 1200m,采用高标号胶结充填技术,在采空区填充抗压强度 20MPa 的胶结充填体,成功控制了围岩变形量在 100mm 以内,保障了开采作业的安全进行。同时,充填体能够封堵瓦斯通道,减少瓦斯泄漏,降低瓦斯爆炸风险,为深部高瓦斯煤矿开采提供了安全保障。

4.2 薄煤层开采

薄煤层(厚度 $\leq 1.3m$)开采一直是煤矿行业的难题,传统采矿方法作业空间狭窄,设备移动困难,资源回收率低,且安全风险高。充填采矿技术可采用小型化充填设备,通过预留矿柱或沿空留巷的方式,实现薄煤层的高效开采。例如,在薄煤层开采中,采用膏体充填技术,将膏体充填体填入采空区,形成稳固的护巷结构,无需留设大量矿柱,资源回收率提升至 85% 以上;同时,充填体为采矿设备提供了稳定的作业平台,改善了作业环境,降低了劳动强度。此外,对于极薄煤层(厚度 $\leq 0.8m$),可采用风力充填技术,将细颗粒骨料吹送至采空区,实现无人化充填,进一步提升开采安全性与效率。

4.3 残矿回收

老矿区经过长期开采,残留了大量边缘矿体、煤柱等残矿资源,这些残矿分布零散、地质条件复杂,传统采矿技术难以

回收。充填采矿技术可通过“采空区充填–残矿开采”的循环模式,先充填已开采形成的采空区,再回收周边残矿。例如,某老矿区采用胶结充填技术,先将矸石胶结充填体填入旧采空区,形成支撑结构后,再采用小型采煤设备回收周边残矿,资源回收率提升了 25%,延长了矿山服务年限。同时,充填体能够有效隔离旧采空区与新采区,避免采空区连通引发的地质灾害,保障残矿回收作业的安全。

4.4 地表保护区域采矿

在城市近郊、河流沿岸、文物保护区等地表保护区域,煤矿开采需严格控制地表沉陷,避免对周边环境与建筑物造成破坏。充填采矿技术是该类区域采矿的理想选择,通过密实充填采空区,将地表沉陷量控制在允许范围内。例如,某煤矿位于河流沿岸,采用膏体充填技术后,地表沉陷量仅为 30mm,未对河流堤坝与周边农田造成影响;某位于文物保护区附近的煤矿,采用高水材料充填技术,成功保护了地下文物遗址,实现了煤炭资源开采与文物保护的协同发展。此外,在铁路、公路等交通干线附近的煤矿,应用充填采矿技术可避免地表沉陷导致的线路变形,保障交通通行安全。

结束语

充填采矿技术作为一种绿色、安全、高效的采矿方法,在煤矿采矿工程中具有显著的应用优势,能够有效解决传统采矿技术带来的地表沉陷、生态破坏、资源浪费等问题,为煤矿行业的可持续发展提供了重要支撑。目前,充填等技术已在深部开采、薄煤层开采、残矿回收、地表保护区域采矿等场景中得到广泛应用,但仍存在充填成本高、效率低、材料性能不稳定等问题。未来,需通过研发低成本、高性能充填材料,优化充填系统与工艺,加强技术推广与人才培养,进一步提升充填采矿技术的应用水平,推动煤矿行业向绿色、安全、高效的方向转型,实现煤炭资源开采与生态环境保护的协同发展。

[参考文献]

- [1]杨向程. 煤矿采矿工程巷道支护技术的应用[J].能源与节能, 2025, (09): 303–306.
- [2]于彦辉. 现代煤矿采矿理念与充填采矿技术探究[J].能源与节能, 2025, (09): 56–58.
- [3]吴志涛. 煤矿采矿工程中的采煤工艺与技术分析[J].当代化工研究, 2022, (20): 141–143.
- [4]张浩. 充填采矿技术在煤炭开采中的应用实践[J].内蒙古石油化工, 2022, 48(08): 82–85.
- [5]马洪涛. 充填采矿技术在煤炭开采中的应用分析[J].矿业装备, 2022, (03): 72–74.
- [6]宋宇晨. 煤矿采矿技术应用现状与改进路径探究[J].内蒙古煤炭经济, 2022, (03): 22–24.